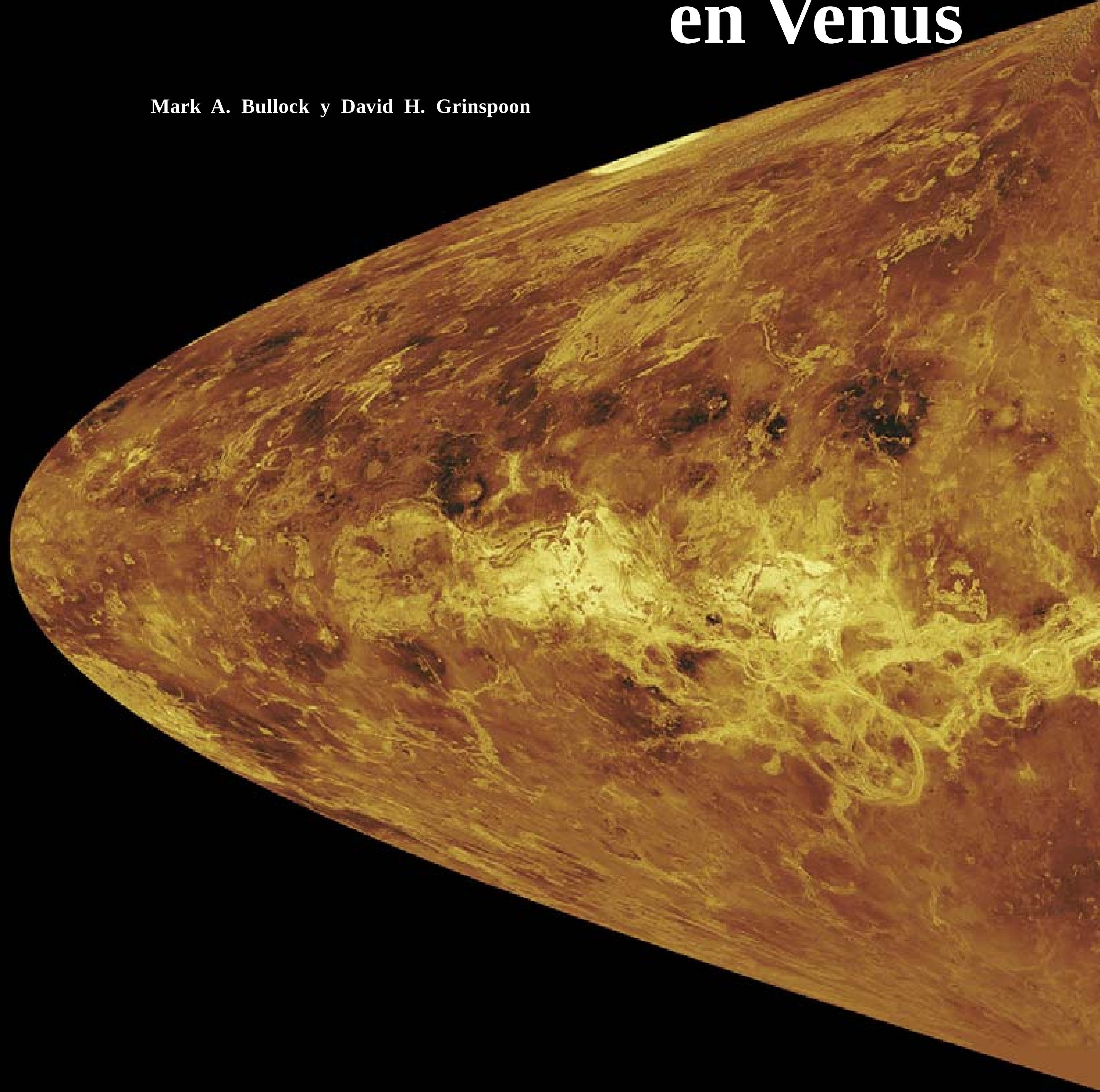
Cambio climático global en Venus

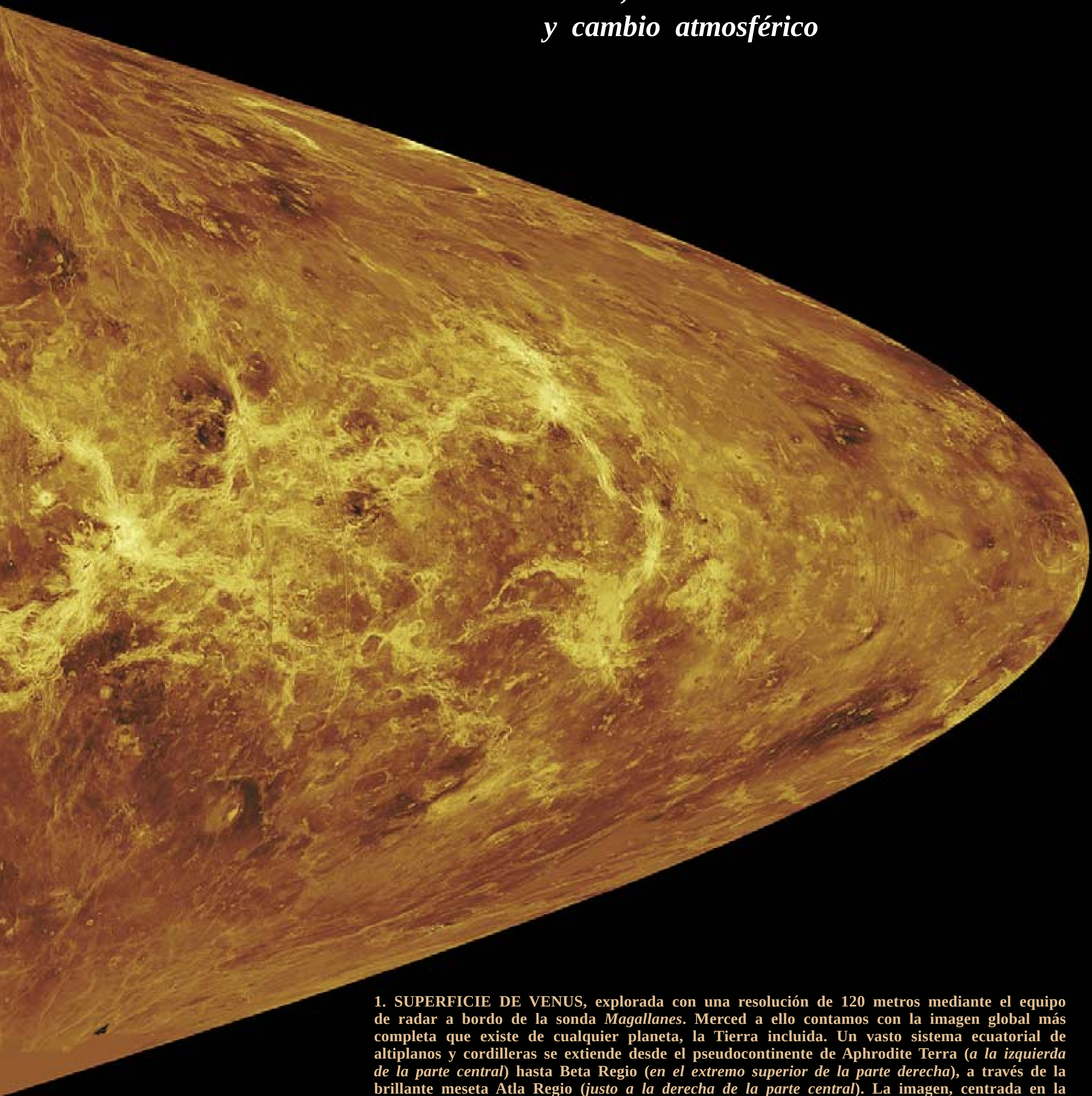
Mark A. Bullock y David H. Grinspoon



VISIT…

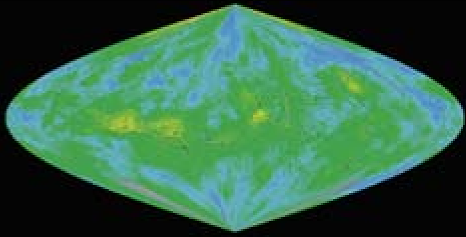
LANZAROTE
Caliente.com

El clima de Venus ha variado a lo largo del tiempo en virtud de las relaciones, recién advertidas, entre actividad tectónica y cambio atmosférico



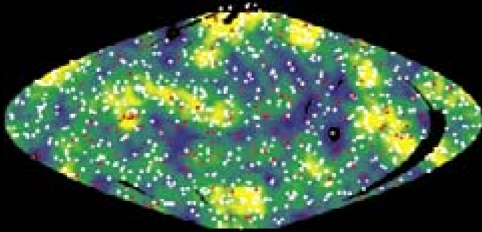
1. SUPERFICIE DE VENUS, explorada con una resolución de 120 metros mediante el equipo de radar a bordo de la sonda *Magallanes*. Merced a ello contamos con la imagen global más completa que existe de cualquier planeta, la Tierra incluida. Un vasto sistema ecuatorial de altiplanos y cordilleras se extiende desde el pseudocontinente de Aphrodite Terra (*a la izquierda de la parte central*) hasta Beta Regio (*en el extremo superior de la parte derecha*), a través de la brillante meseta Atla Regio (*justo a la derecha de la parte central*). La imagen, centrada en la longitud de 180 grados, se ha construido utilizando una proyección sinusoidal; se distingue de las proyecciones tradicionales (Mercator, por ejemplo) en que no deforma el área a diferentes latitudes. Las regiones oscuras corresponden a terrenos lisos en la escala de la longitud de onda del radar (13 centímetros); las áreas brillantes son zonas abruptas. Las estrías meridianas son artefactos resultantes de la construcción de la imagen.

TOPOGRAFIA



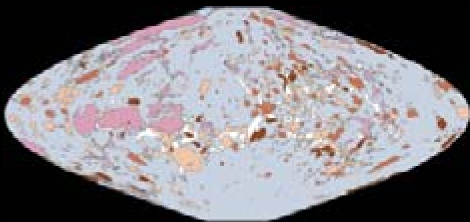
La topografía de Venus abarca una amplia gama de altitudes, unos 13 kilómetros de variación desde los terrenos bajos (*azul*) hasta los altos (*amarillo*). Tres quintas partes de la superficie se encuentran en un margen de 500 metros alrededor de la altura media, determinada por un radio planetario de 6051,9 kilómetros.

CRATERES DE IMPACTO



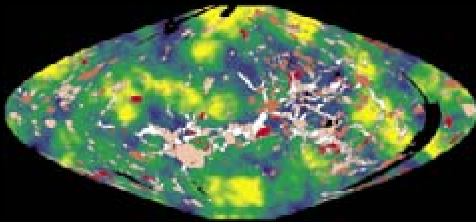
Los cráteres de impacto se encuentran distribuidos al azar sobre toda la superficie de Venus. La mayoría son primitivos (*puntos blancos*); los modificados por lava (*puntos rojos*) o fallas (*triángulos*) se concentran en Aphrodite Terra. Las regiones con baja densidad de cráteres (*fondo azul*) suelen hallarse en tierras altas; en llanuras bajas, las densidades más altas de cráteres (*fondo amarillo*).

CLASES DE TERRENO



El terreno de Venus está constituido principalmente por llanuras volcánicas (*azul*). Dentro de las llanuras hay regiones deformadas —zonas de enlosado (*rosado*) y fallas (*blanco*)—, accidentes volcánicos —coronas (*melocotón*), inundaciones de lava (*rojo*) y volcanes de diversos tamaños (*anaranjado*)—. Los volcanes no se enlazan en cadenas, señal de que la tectónica de placas no interviene en Venus.

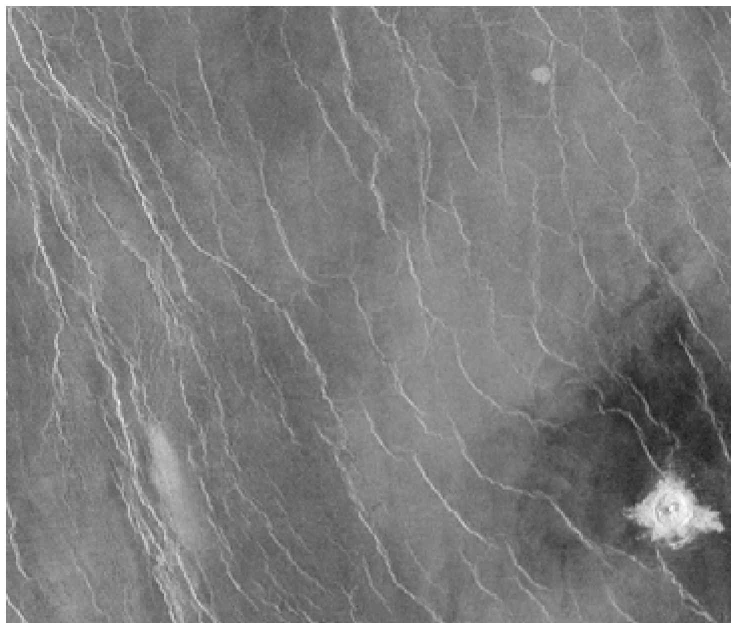
EDADES DEL TERRENO



Este mapa geológico muestra los diferentes suelos y sus edades relativas inferidas a partir de la densidad de cráteres. Los volcanes y las coronas tienden a agruparse alrededor de zonas de falla ecuatorial, que son más jóvenes (*azul*) que el resto de la superficie de Venus. Los enlosados, cordilleras y llanuras son más antiguos (*amarillo*). Sin embargo, la superficie carece en general de las grandes variaciones de edad que apreciamos en la Tierra y Marte.



2. ¿UN RIO EN VENUS? El delta aparece al final de un estrecho canal que recorre 800 kilómetros de las llanuras volcánicas septentrionales. No puede haberlo formado el agua, porque Venus es demasiado cálido y seco. Quizá lo crearan lavas ricas en sales de carbonatos y sulfatos, lo que implicaría que la temperatura media en el pasado era varias decenas de grados superior a la actual. La región que se muestra representa una zona aproximada de unos 40 por 90 kilómetros.



3. LAS CORDILLERAS DE PLEGAMIENTO son el accidente más común en las llanuras volcánicas de Venus. Discurren paralelas, a intervalos regulares; emergieron verosímilmente cuando las llanuras estaban sometidas a tensiones, por culpa, tal vez, de un cambio brusco de la temperatura en superficie. Esta región, que forma parte de las llanuras ecuatoriales conocidas como Rusalka Planitia, mide unos 300 kilómetros de diámetro.

Emergieron a la vez del caldero presolar. La Tierra y Venus presentaban parejo tamaño y composición. Pero siguieron trayectorias evolutivas dispares hasta convertirse en mundos radicalmente diferentes. La temperatura en superficie del planeta gemelar de la Tierra es de unos 460 grados Celsius, suficientes para que las rocas brillen a los ojos de cualquier infortunado representante de la química del carbono que se acercara. Domina un letal efecto invernadero, mantenido por una atmósfera cuyo componente principal es el dióxido de carbono, un aislante eficaz. No hay agua líquida. La presión del aire en superficie centuplica casi la de la Tierra; en muchos aspectos esa envoltura fluida es más océano que atmósfera. Ciñen al planeta nubes de ácido sulfúrico, abastecidas en su química por compuestos gaseosos de azufre más algo de vapor de agua.

Debemos ese cuadro de infierno a una flota de 22 sondas espaciales que han fotografiado, explorado, analizado y pisado Venus en los últimos 37 años. Pero en buena parte de ese período las nubes que ocultan Venus impidieron un reconocimiento completo de la superficie. La idea que la ciencia tenía del planeta permanecía invariable porque se sabía muy poco de los procesos dinámicos, del vulcanismo o la tectónica, que podían haberse dado allí. Las cosas cambiaron con la sonda *Magallanes*. Desde 1990 hasta 1994, la nave cartografió la superficie entera del planeta con alta resolución, observando a través de las nubes con el radar. Nos mostró un planeta que ha experimentado enormes erupciones volcánicas en el pasado y que, casi con seguridad, sigue activo. A la par que la sonda exploraba la historia tectónica de Venus, las simulaciones por ordenador han tratado de reconstruir los últimos mil millones de años de su historia climática. Un vulcanismo intenso ha inducido una transformación global del clima. A diferencia de cualquier otro planeta conocido, excluida la Tierra, Venus presenta un clima complicado y en evolución.

Marte, nuestro otro vecino, ha sufrido también importantes cambios de clima. Su atmósfera actual guarda, sin embargo, información de su ayer tectónico. El interior de Marte es demasiado frío para que perviva un vulcanismo activo; la superficie permanece en una helada quietud. Aunque las variaciones del movimiento orbital y de rotación de Marte pueden inducir cambios climáticos, el vulcanismo no volverá a participar en ellos. En la Tierra y Venus reinan climas gobernados por la interacción dinámica entre los procesos atmosféricos y tectónicos.

Desde la situación de privilegio que ocupamos en el sistema solar, podemos preguntarnos por qué si intervinieron fuerzas semejantes a las que operaron en la Tierra produjeron un efecto tan diferente en Venus. El estudio de este planeta ha dilatado la exposición de la evolución climática más allá del ejemplo singular de la Tierra. Ha aportado nuevas perspectivas para abordar cuestiones apremiantes: ¿Hasta qué punto es único el clima de la Tierra? ¿Cuál es su grado de estabilidad? Con el creciente volumen de residuos, la sociedad industrial se ha lanzado a una aventura incontrolada, de extensión global, sobre el clima terrestre. Si logramos identificar los factores que condicionan la evolución del clima en otros planetas, podremos comprender los mecanismos naturales y antropogénicos que alteran el clima de la Tierra.

Veámoslo con un ejemplo. Mucho antes de que el agujero de ozono se convirtiera en tema común de debate, la investigación se afanaba por desentrañar la exótica fotoquímica de la alta atmósfera de Venus. Se halló que el cloro reducía los niveles de oxígeno libre que había por encima de las nubes del planeta. A la larga, la solución del proceso de Venus arrojó luz sobre un proceso análogo en la Tierra, donde el cloro procedente de fuentes artificiales destruye el ozono estratosférico.

Una de las causas de la variabilidad del clima de la Tierra reside en la naturaleza de su atmósfera, producto del intercambio continuo de gases entre corteza, manto, océanos, casquetes polares y espacio exterior. El motor postrero de los procesos geológicos, la energía geotérmica, impulsa también la evolución de la atmósfera. La energía geotérmica se libera, principalmente, con la desintegración de elementos radiactivos del in-

terior. Pero no resulta tan sencillo explicar la pérdida de calor en los planetas sólidos. Los dos mecanismos principales implicados son el vulcanismo y la tectónica de placas.

Por lo que a la Tierra concierne, su interior cuenta con un sistema de cinta transportadora asociado a la tectónica de placas, cuyo continuo reciclado de gases ha ejercido una fuerza estabilizadora sobre el clima de la Tierra. Los volcanes bombean gases a la atmósfera; la subducción de placas litosféricas los devuelve al interior. Si bien la mayoría de los volcanes están asociados con la actividad de la tectónica de placas, hay estructuras volcánicas notables (las islas Hawai, por ejemplo) que se han erigido en "puntos calientes", independientes de los contornos de las placas. En el curso de la historia, la formación de inmensas provincias volcánicas —zonas de pertinaz erupción avivada quizá por enormes penachos de magma que flotan en el manto subyacente— podría haber expulsado cantidades ingentes de gases y conducido a períodos de calentamiento global.

¿Qué ocurrió en Venus? Antes de la misión *Magallanes*, la descripción de la estructura y dinámica históricas del planeta fundábase en hipótesis extraídas de comparaciones con la Tierra, que partían de supuestas semejanzas de composición y producción de calor geotérmico. Ahora se está perfilando un cuadro autónomo y global de la historia de la superficie de Venus: la tectónica de placas, si interviene, será a escala limitada; al menos en un pasado reciente, el calor se intercambió mediante la erupción de vastas llanuras de lava basáltica y, más tarde, mediante los volcanes que se formaron encima de ellas. La comprensión de los efectos de los volcanes constituye obligado punto de arranque de cualquier aproximación al clima del planeta.

De la exploración global de la sonda *Magallanes* nos ha llegado un descubrimiento sorprendente, la escasez de cráteres de impacto. Aunque la atmósfera de Venus, muy densa, se baste para proteger el planeta de pequeños objetos incidentes —detiene a la mayoría de los meteoritos inferiores a un kilómetro de diámetro, capaces de abrir cráteres de hasta 15 kilómetros de diámetro—, se echan a faltar grandes cráteres. La observación del número de asteroides y cometas en el sistema solar interno, así como el recuento de cráteres en la Luna, nos dan una pista de la cadencia con que Venus debería de haber acumulado rastros de impactos: en torno a 1,2 cráteres por millón de años. El último recuento de la sonda *Magallanes* sumó sólo 963 cráteres distribuidos al azar por la superficie. Se han borrado los impactos de los primeros 3700 millones de años de la historia del planeta.

MARK A. BULLOCK y DAVID H. GRINSPOON se hallan adscritos a la Universidad de Colorado en Boulder. Bullock, que inició su carrera estudiando la degradación de compuestos orgánicos en Marte, aborda ahora otro tipo de degradación, el de las condiciones benignas de Venus. Grinspoon, investigador de la evolución de la vida y de las atmósferas planetarias, pertenece a un comité que aconseja a la NASA en asuntos de política espacial.

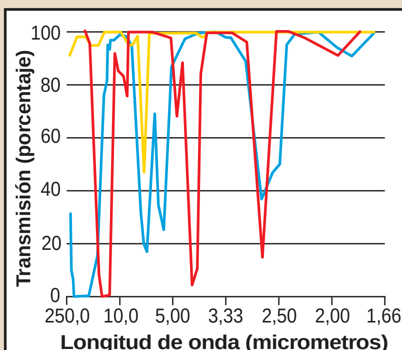
La escasez de cráteres se deja sentir también en la Tierra. La acción del viento y el agua ha terminado por erosionar los cráteres antiguos. Aquí, las condiciones en que se hallan los lugares de impacto varían desde la prístina taza del Cráter del Meteoro en Arizona hasta los contornos apenas discernibles de los impactos precámbricos, enterrados en la corteza continental más antigua. Pero la superficie de Venus registra un calor tal, que impide la existencia de agua líquida; además, los vientos de superficie son flojos. Sin erosión, los procesos que alteran y, a la larga, borran los cráteres de impacto serán la actividad volcánica y la tectónica. Lo que nos empuja a una paradoja. La mayoría de los cráteres de Venus parecen recientes: sólo un seis por ciento tiene cubiertos de lava sus bordes y sólo el 12 por ciento ha sido deformado por plegamientos y fallas de la corteza. ¿Dónde fueron a parar los cráteres antiguos, si la mayoría de los que quedan no han sido alterados? Si han sido tapados por lava, ¿por qué no se ven más cráteres parcialmente cubiertos? ¿Cómo desaparecieron sin que se perdiera su colocación original al azar?

Para algunos, la distribución aleatoria de los cráteres observados y el número restringido de los parcialmente modificados reclaman la existencia de un episodio cataclísmico de proporciones globales que borró de cuajo todos los cráteres hace 800 millones de años. En ese marco, propuesto en 1992 por Gerald G. Schaber, de la Inspección Geológica de los Estados Unidos (USGS), y Robert G. Strom, de la Universidad de Arizona, los impactos han acribillado la nueva superficie formada con posterioridad a esa fecha.

Pero la idea de recubrir un planeta entero con una nueva superficie resulta inaceptable para otros expertos. No cabe pensar en un fenómeno tal en la Tierra. Roger J. Phillips, de la Universidad de Washington, propuso el mismo año un modelo distinto. El recubrimiento superficial en equilibrio, así se denomina, admite que existen procesos geológicos persistentes que borran los cráteres en pequeñas extensiones de terreno de forma continua, preservando una distribución global que parece aleatoria. Contra esa hipótesis labora la magnitud,

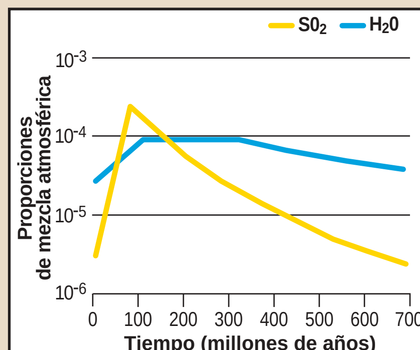
EFECTO DE INVERNADERO

Los gases de invernadero permiten que la luz solar alcance la superficie de Venus, pero bloquean la radiación infrarroja emitida. El dióxido de carbono (*rojo*), agua (*azul*) y dióxido de azufre (*amarillo*) absorben cada uno en una banda particular de la longitud de onda. Si no fuera por esos gases, la radiación solar y la infrarroja se equilibrarían a una temperatura de superficie de unos –20 grados Celsius.



CONCENTRACIONES DE GASES

El agua y el dióxido de azufre que los volcanes arrojan a la atmósfera son luego eliminados. El dióxido de azufre (*amarillo*) reacciona bien con los carbonatos de superficie, mientras que la radiación solar ultravioleta disocia el agua (*azul*).



enorme, de algunos accidentes geológicos de Venus; la actividad geológica no borraría, pues, los cráteres de forma limpia y aleatoria en todas partes.

Estos dos puntos de vista maduraron hasta establecer un debate científico a medida que se afinaba el análisis de los datos de *Magallanes*. La verdad podría hallarse a medio camino. De hecho, la teoría predominante acerca de los últimos mil millones de años de la historia geológica de Venus incorpora elementos de uno y otro modelo: un vulcanismo generalizado borró la mayoría de los cráteres de impacto y creó extensas planicies volcánicas hace 800 millones de años, a lo que siguió un nivel moderado de incesante actividad volcánica hasta hoy.

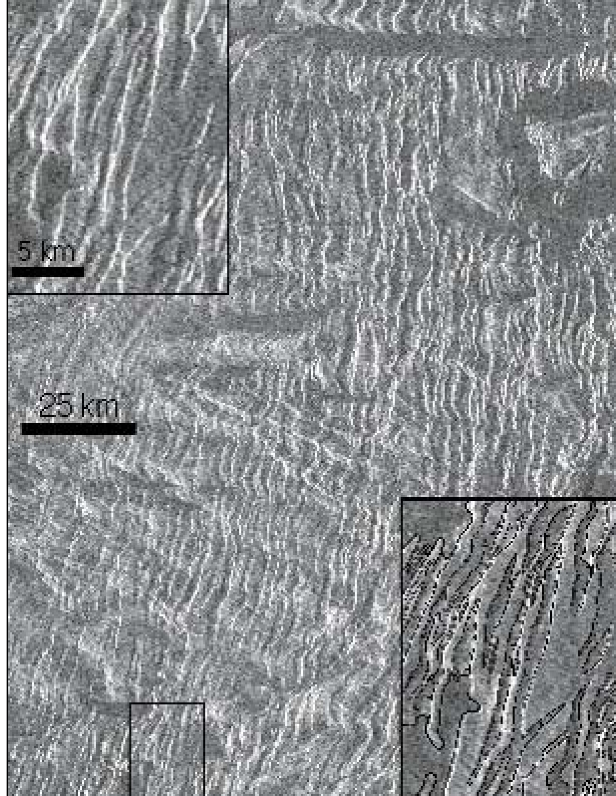
El vulcanismo ha sido, sin duda, una fuerza determinante de la creación de la superficie de Venus. Pese a ello, la interpretación de ciertos rasgos enigmáticos no había podido integrarse, hasta hace poco, en un cuadro coherente de la evolución del planeta. Entre esas notas, la posibilidad de que el clima del planeta haya sufrido una transformación radical.

Distinguimos, en primer lugar, diversas estructuras lineales, curiosas, que recuerdan a los suelos labrados por las aguas. Con una longitud de hasta 7000 kilómetros, son viva estampa de nuestros ríos sinuosos y llanuras de inundación. Muchas de esas estructuras terminan en canales de eyección parecidos a deltas. La extrema sequedad del entorno hace improbable que las aguas excavasen esos accidentes. ¿A qué se deben, pues? Tal vez el carbonato cálcico, el sulfato cálcico y otras sales sean los culpables. La superficie, que se mantiene en equilibrio con una pesada atmósfera de dióxido de carbono y gases sulfúricos, debe de estar repleta de esas substancias. De hecho, los módulos de aterrizaje soviéticos *Venera* hallaron que las rocas de superficie contienen de un 7 a un 10 por ciento de minerales de calcio (casi con certeza carbonatos) y de un 1 a un 5 por ciento sulfatos.

Las lavas cargadas con esas sales fundieron a temperaturas entre unas pocas decenas hasta unas centenas de grados más altas que la temperatura actual de la superficie de Venus. El grupo de la USGS encabezado por Jeffrey S. Kargel conjeturó que entre unos centenares de metros y varios kilómetros bajo la superficie podría haber, a la manera de nuestros acuíferos subterráneos, vastos depósitos de un magma (rico en sales) de carbonatita fundida. En el pasado, una temperatura superficial algo más elevada podría haber derramado lavas fluidas ricas en sales sobre la superficie, cuya estabilidad explicaría la acción forjadora de los accidentes que vemos en la actualidad.

En segundo lugar, los misteriosos enlosados —los terrenos más antiguos de Venus— sugieren también la existencia de altas temperaturas en el pasado. Estos paisajes, surcados de arrugas, se encuentran en mesetas parecidas a continentes que se elevan varios kilómetros por encima de las llanuras de lava. A tenor de los análisis realizados por Phillips y Vicki L. Hansen, de la Universidad Metodista del Sur, las mesetas se formarían por dilatación de la litosfera (el exoesqueleto rígido del planeta, formado por la corteza y el manto superior). El proceso sería, en una imagen frecuente, similar al estiramiento de un bombón de caramelo recubierto de chocolate, cuyo interior es pegajoso, y delgada y quebradiza la corteza. En la actualidad, la parte más externa y frágil de la corteza es demasiado gruesa para comportarse de esa manera. En la época de formación de los enlosados esta capa tuvo que ser mucho más delgada, lo que implica que la superficie estaba mucho más caliente.

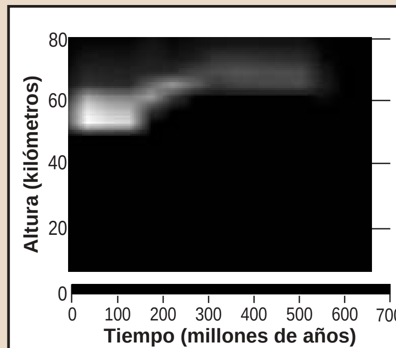
Grietas y pliegues surcan el planeta. Algunas de esas configuraciones, por lo menos las cordilleras arru-



4. LOS TERRENOS EN FORMA DE CINTAS están formados por vaguadas poco profundas (400 metros) con laderas abruptas y fondo plano. Estos accidentes pudieron resultar de la fractura de una capa de roca delgada y frágil que se hallaría encima de un substrato débil y dúctil. La imagen muestra una ampliación de la región del interior del rectángulo sombreado, con las vaguadas marcadas en el ángulo inferior derecho.

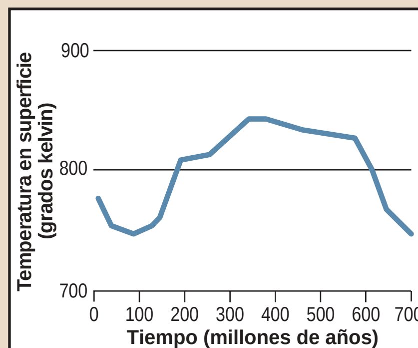
COBERTURA DE NUBES

Las nubes de ácido sulfúrico varían en espesor después de una serie global de erupciones volcánicas. En primer lugar, las nubes ganan espesor a medida que el agua y el ácido sulfúrico salen arrojados al aire. Después lo pierden conforme decrece la concentración de esos gases. Transcurridos unos 400 millones de años del comienzo del vulcanismo, las nubes ácidas son sustituidas por nubes de agua delgadas y altas.



TEMPERATURA

La temperatura de superficie depende de la importancia relativa de las nubes y del efecto invernadero. Inicialmente, el vulcanismo produce nubes potentes que enfrían la superficie. Ahora bien, puesto que el agua desaparece de la atmósfera del planeta más despacio que el dióxido de azufre, se produce a continuación un efecto de invernadero que calienta la superficie.



¿Por qué es Venus un infierno?

Las clamorosas diferencias de clima que distinguen ahora la Tierra de Venus guardan relación con la historia del agua en ambos mundos. Los océanos y la atmósfera de la Tierra contienen hoy 100.000 veces más agua que la atmósfera de Venus. En nuestro planeta, el agua líquida ejerce funciones intermediarias en reacciones del dióxido de carbono con las rocas superficiales, gracias a lo cual el dióxido de carbono del aire puede formar minerales. Además, es probable que el agua escondida en el manto subyacente sea responsable de la capa de baja viscosidad, o astenosfera, sobre la cual se deslizan las placas litosféricas de la Tierra. La formación de minerales carbonatados y su posterior descenso con las placas tectónicas evitan que el dióxido de carbono se acumule hasta los niveles hallados en Venus.

No obstante, los modelos de formación de los planetas predicen que los dos mundos deberían de haber disfrutado de aproximadamente la misma cantidad de agua, proporcionada por el impacto de cuerpos helados procedentes del sistema solar externo. Cuando la misión *Pioneer* se puso en órbita en 1978, se midió la relación de deuterio a hidrógeno ordinario en el agua de las nubes de Venus. Para sorpresa de todos, la presencia de deuterio era 150 veces mayor allí que en la Tierra. Se supone que, en el pasado, Venus había tenido mucha más agua y la perdió. Lo mismo el hidrógeno que el deuterio, químicamente equivalentes, se hallaban integrados en moléculas de agua. Cuando el vapor de agua se difundió hasta la alta atmósfera, la radiación solar ultravioleta lo disoció en oxígeno e hidrógeno o deuterio. Puesto que el hidrógeno, más ligero, escapa al espacio con mayor facilidad que el deuterio, aumentó la cantidad relativa de deuterio.

¿Por qué tuvo lugar este proceso en Venus y no en la Tierra? En 1969, Andrew P. Ingersoll, del Instituto de Tecnología de California, mostró que, si en un planeta se disponía de suficiente energía solar, se evaporaría en seguida toda el agua de superficie. El vapor de agua liberado calentaría más la atmósfera y provocaría un efecto invernadero descontrolado. El proceso transportaría el grueso del agua del planeta a la atmósfera superior, donde, disociada, acabaría por perderse. Más tarde, James F. Kasting, de la Universidad estatal de Pennsylvania, y sus colaboradores desarrollaron un modelo pormenorizado de ese efecto. Estimaron que la irradiancia solar crítica necesaria para iniciar un efecto de invernadero descontrolado era alrededor de un 40 por ciento mayor que la que se recibe en la Tierra. Este valor corresponde, más o menos, a la irradiancia solar que se recibiría en la órbita de Venus poco después de su formación, cuando la luz del Sol era un 30 por ciento más débil. En los primeros 30 millones de años de su existencia Venus pudo dejar escapar una cantidad de agua equivalente a un océano terrestre.

En el modelo queda un cabo suelto. Si Venus tenía en sus comienzos una densa atmósfera de dióxido de carbono como la actual, habría retenido una fracción notable de agua. El volumen de agua que se pierde depende de cuánta puede ascender a altura suficiente para disociarse. Ahora bien, el ascenso es menor en un planeta con atmósfera densa. Además, las nubes que se formaran durante el proceso habrían reflejado la radiación solar hacia el espacio y detenido el efecto invernadero descontrolado.

Así las cosas, el grupo de Kasting consideró la posibilidad de una irradiancia solar ligeramente por debajo del valor crítico. En ese cuadro, Venus tendría océanos calientes y una estratosfera húmeda. Los mares mantendrían bajos los niveles de dióxido de carbono al disolver el gas y facilitar la formación de carbonatos. Con la lubricación proporcionada por la presencia de agua en la astenosfera, podría haber entrado en funcionamiento la tectónica de placas. En resumen, Venus habría poseído mecanismos de estabilización del clima similares a los que operan ahora en la Tierra. Pero estos mecanismos no eran infalibles. La menor densidad de la atmósfera no podía impedir que el agua se difundiera hasta grandes alturas. En los subsiguientes 600 millones de años, desapareció una cantidad de agua equivalente a un océano terrestre. La tectónica de placas dejó de actuar; sólo el vulcanismo y la conducción del calor constituían los únicos mecanismos de enfriamiento del interior. Tiempo después, el dióxido de carbono se acumuló en el aire.

Esta hipótesis del efecto invernadero húmedo ilustra la relación entre los cambios solar, climático y tectónico. Los procesos atmosféricos y superficiales se refuerzan mutuamente y preservan el *statu quo*; pero pueden también colaborar en su propia destrucción. Si la teoría es correcta, Venus tuvo océanos en el pasado y quizás incluso vida, aunque sea imposible saberlo con seguridad.

—*M.A.B.* y *D.H.G.*

gadas, pueden guardar relación con variaciones temporales del clima. Junto con Sean C. Solomon, de la Institución Carnegie de Washington, hemos razonado que las llanuras conservan episodios de deformación globalmente coherentes que ocurrieron quizá durante cortos períodos de historia tectónica. Según parece, la litosfera entera sufrió un proceso de dilatación o compresión general. Pero semejante proceso global requiere un mecanismo interno difícil de imaginar en un planeta sólido. Mas ¿qué decir de una variación del clima en su conjunto? Solomon calculó que las fluctuaciones de la temperatura en superficie de unos 100 grados Celsius habrían inducido en la litosfera tensiones de unos 1000 bares, del mismo orden que las que originan cinturones montañosos en la Tierra y suficientes para deformar la superficie de Venus.

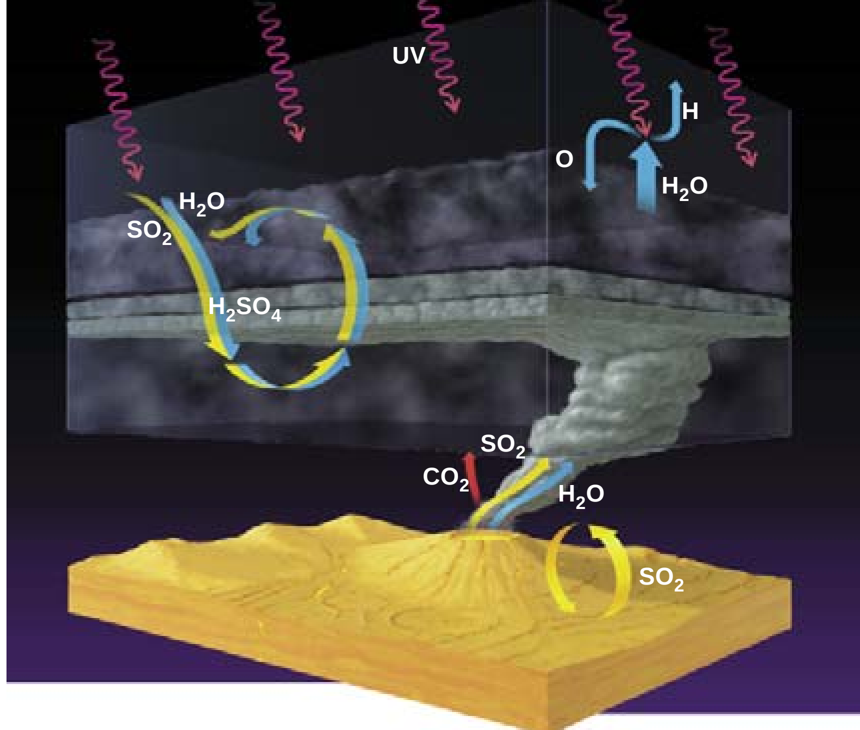
Por las fechas en que el debate sobre la historia tectónica reciente de Venus se exacerbaba, nos encontrábamos perfilando un modelo de su atmósfera. La teoría muestra que las extrañas y hostiles condiciones ambientales se mantienen debido a propiedades complementarias de los constituyentes de la atmósfera. El vapor de agua, incluso en cantidades traza, absorbe radiación infrarroja en longitudes de onda en que no lo hace

el dióxido de carbono. Al propio tiempo, el dióxido de azufre y otros gases bloquean las demás longitudes de onda. Considerados en su conjunto, esos gases de invernadero determinan que la atmósfera de Venus sea parcialmente transparente a la radiación solar incidente, pero casi completamente opaca a la radiación infrarroja emitida. En consecuencia, la temperatura de superficie (medida en grados kelvin) triplica la que el planeta tendría sin atmósfera. En comparación, el efecto de invernadero terrestre eleva hoy la temperatura de superficie en sólo un 15 por ciento.

Si fue cierto que los volcanes recubrieron la superficie de Venus hace 800 millones de años, debieron de vomitar también una cantidad ingente de gases de invernadero a la atmósfera en un intervalo de tiempo bastante corto. Entra dentro de lo razonable admitir que las erupciones produjeron lava suficiente para recubrir el planeta con una capa de uno a 10 kilómetros de espesor. En esa hipótesis, la cantidad de dióxido de carbono en la atmósfera apenas habría cambiado; lo contenía ya en abundancia. Pero la concentración de vapor de agua y dióxido de azufre se habrían decuplicado y centuplicado, respectivamente. Fascinados por las posibles implicaciones, elaboramos un modelo del clima del planeta entendido como un sistema de procesos conectados, que incluyen la liberación de gases por los volcanes, la formación de nubes, la pérdida de hidrógeno en las capas superiores de la atmósfera y la reacción de los gases atmosféricos con los minerales de la superficie.

Entre esos procesos se desarrolla una interacción sutil. Aunque el dióxido de carbono, el vapor de agua y el dióxido de azufre calientan la superficie, los dos últimos ejercen también un efecto compensador: la formación de nubes. Con una concentración mayor de vapor de agua y dióxido de azufre no sólo se reforzaría el efecto invernadero, sino que aumentaría también el espesor de las nubes, que reflejan la luz del Sol hacia el espacio y, por consiguiente, enfrían el planeta. Ante tales efectos contrapuestos, no podemos decidir qué resultó de la inyección de los dos gases para el clima global.

De acuerdo con nuestras simulaciones, predominó en un comienzo el efecto de las nubes; la superficie se enfrió unos 100 grados Celsius. Luego, las nubes fueron poco a poco disipándose. El agua se difundió hasta las capas superiores de la atmósfera, donde la disoció la radiación solar ultravioleta. Y así se escapó el hidrógeno al espacio; lo hizo de forma paulatina. La atmósfera perdió la mitad de este gas en los primeros 200 millones de años. Mientras tanto, el dióxido de azufre reaccionaba con las rocas calizas. Como han demostrado experimentos de laboratorio llevados a cabo por Bruce Fegley, Jr., de la Universidad de Washington, y sus colaboradores, los carbonatos absorben el dióxido de azufre de la atmósfera de Venus mucho más deprisa que lo que tarda el agua en perderse en el espacio.



5. LA ATMOSFERA DE VENUS, cubierta de nubes de ácido sulfúrico (H_2SO_4), sufre temperaturas de horno y presiones de océano. Venus, y ésa es la razón del infierno, carece de los ciclos que estabilizan las condiciones en la Tierra. Sus procesos atmosféricos proceden en una sola dirección. El dióxido de carbono (CO_2), una vez inyectado por los volcanes, permanece en la atmósfera; el agua (H_2O), tras ser destruida por la radiación ultravioleta, se pierde para siempre en las profundidades del espacio; el dióxido de azufre (SO_2), en cuanto queda atrapado en los minerales, se acumula en la superficie (aunque se recicla una pequeña cantidad).

Conforme menguaban las nubes, llegaba al suelo más energía solar, calentándolo. Tras unos 200 millones de años, las temperaturas subieron lo suficiente para empezar a evaporar las nubes desde abajo. Se produjo una realimentación positiva: cuanto más se degradaban las nubes, menos radiación solar volvía reflejada al espacio; a mayor calentamiento de la superficie, mayor evaporación de las nubes desde abajo, y así sucesivamente. La espesa cobertura de nubes desapareció muy presto. Transcurridos unos 400 millones de años, apenas quedaba una tenue capa nubosa a gran altura, compuesta principalmente por vapor de agua. La temperatura de superficie superaba en unos 100 grados centígrados los valores actuales, porque la abundancia de vapor de agua atmosférico era todavía bastante alta y porque las nubes, adelgazadas, contribuían al efecto de invernadero sin reflejar mucha radiación solar. Pasados unos 600 millones de años desde el comienzo del vulcanismo global, y en ausencia de actividad volcánica ulterior, las nubes desaparecieron.

Puesto que se van perdiendo sin cesar el dióxido de azufre y el vapor de agua, para persistir las nubes necesitan que no se apague la actividad volcánica. A tenor de nuestros cálculos, para dar vida a las espesas nubes que observamos hoy, tuvo que haber episodios de vulcanismo activo en los últimos 30 millones de años. Los procesos internos que generan vulcanismo en la superficie operan durante períodos superiores a las decenas de millones de años; cabe, pues, la posibilidad de que los volcanes sigan vivos. Ello concuerda con la observación de variaciones en la concentración de dióxido de azufre

en Venus. Larry W. Esposito, de la Universidad de Colorado en Boulder, observó en 1984 que la concentración de dióxido de azufre en la parte superior de las nubes había disminuido en más de una décima parte durante los primeros cinco años de la misión *Pioneer Venus*, de 1978 a 1983. Las variaciones de este gas y de las partículas nubosas asociadas, concluyó, se debían al vulcanismo. Las fluctuaciones de la temperatura en superficie, estimuladas por el vulcanismo, constituyen otra explicación natural de muchos rasgos desconcertantes observados por la sonda *Magallanes*.

Por fortuna, el clima de la Tierra no ha padecido condiciones tan extremas en su pasado geológico reciente. Aunque no exenta de vulcanismo, su atmósfera rica en oxígeno —aportado por los organismos y agua abundante— elimina sin problemas los gases sulfurosos. Por tanto, las nubes de agua son un factor clave para el equilibrio térmico del planeta. La cantidad de vapor de agua de que disponen viene determinada por la evaporación de los océanos, que a su vez depende de la temperatura superficial. Un efecto invernadero ligeramente incrementado se traduce en mayor cantidad de agua en la atmósfera y da por resultado mayor cobertura nubosa. La mayor reflectividad reduce la energía solar incidente y, con ello, la temperatura. Esta realimentación negativa actúa como un termostato; modera la temperatura de superficie durante cortos intervalos de tiempo (de días a años). Una realimentación similar, el ciclo del carbonato-silicato, estabiliza también la concentración de dióxido de carbono atmosférico. Gobernado por el lento proceso de la tectónica de placas, este mecanismo opera en escalas temporales del orden del medio millón de años.

Ciclos tan interesantes, que se entrelazan con los ciclos del agua y de la vida, han ahorrado al clima de la Tierra las oscilaciones extremas que ha soportado su planeta hermano. Pero las influencias antropogénicas actúan en escalas de tiempo intermedias. La concentración de dióxido de carbono en la atmósfera terrestre ha aumentado en una cuarta parte desde 1860. Se admite que estamos asistiendo a un calentamiento global, aunque se debata la cuantía debida a combustión de carburantes fósiles y la fracción asignable a variaciones naturales. No se sabe si existe una cantidad crítica de dióxido de carbono que rompa los ciclos de regulación climática de la Tierra. Pero una cosa es cierta: los climas de los planetas semejantes a la Tierra pueden experimentar bruscas transiciones en razón de las interacciones entre procesos a escala planetaria. A la larga, el destino de la Tierra está decidido. Conforme el Sol envejece, brilla más. De aquí a mil millones de años, los océanos iniciarán un proceso de evaporación acelerada y el clima sucumbirá a un efecto de invernadero irrefrenable. La Tierra y Venus, que comenzaron siendo gemelos casi idénticos para luego seguir caminos distintos, acabarán quizá por retomar su parecido.

Nos agrada recordar el panorama rosáceo de la ciencia y la técnica de nuestra infancia, en los años sesenta. La capacidad de la Tierra para abastecernos de materiales y absorber basura parecía ilimitada. La perspectiva ha cambiado de raíz. La ciencia concibe ahora la Tierra como hogar generoso pero finito. Los desechos producidos por la sociedad industrial pueden modificar el clima del planeta. El estudio de Venus, por muy ajeno que pueda parecer, es esencial para la búsqueda de principios generales de la variación climática y, por tanto, para la comprensión de la fragilidad o robustez del mundo que habitamos.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE STABILITY OF CLIMATE ON VENUS. Mark A. Bullock y David H. Grinspoon en *Journal of Geophysical Research*, volumen 10, n.º E3, páginas 7521-7530; marzo 1996.

VENUS II: GEOLOGY, GEOPHYSICS, ATMOSPHERE AND SOLAR ENVIRONMENT. Dirigido por Stephen W. Bougher, Donald M. Hunten y Roger J. Phillips. University of Arizona Press, 1997.

VENUS REVEALED: A NEW LOOK BELOW THE CLOUDS OF OUR MISTERIOUS TWIN PLANET. David H. Grinspoon. Perseus Books, 1997.

THE NEW SOLAR SYSTEM. Cuarta edición. Dirigido por J. Kelly Beatty, Carolyn Collins Petersen y Andrew Chaikin. Cambridge University Press, 1998.

Existe un atlas interactivo de Venus, disponible en la página Web www.ess.ucla.edu/hypermap/Vmap/top.html.